

## ОЦЕНКА НЕТЕПЛОВОЙ ПОТЕРИ АТМОСФЕРЫ ЭКЗОПЛАНЕТЫ GJ 436b ЗА СЧЕТ ПРОЦЕССОВ ДИССОЦИАЦИИ H<sub>2</sub>

А. А. Автаева<sup>1,2</sup>, В. И. Шематович<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН, Москва, <sup>2</sup>ГАИШ МГУ, Москва

Оценен вклад процессов диссоциации молекулярного водорода жестким ультрафиолетовым (УФ) излучением и сопутствующим потоком фотоэлектронов в образование фракции надтеплового атомарного водорода в переходной H<sub>2</sub> → H области и формирование нетеплового потока убегания из протяженной верхней атмосферы экзопланеты — горячего нептона GJ 436b. Рассчитаны скорость образования и энергетический спектр атомов водорода, образующихся с избытком кинетической энергии при диссоциации H<sub>2</sub>.

## ESTIMATES OF NON-THERMAL ATMOSPHERIC LOSS OF EXOPLANET GJ 436b DUE TO DISSOCIATION PROCESSES H<sub>2</sub>

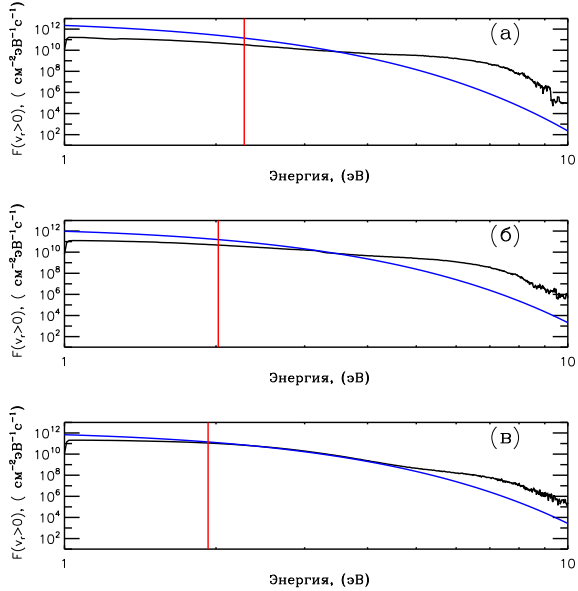
A. A. Avtaeva<sup>1,2</sup>, V. I. Shematovich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, <sup>2</sup>SAI MSU, Moscow

The contribution of the processes of dissociation of molecular hydrogen by hard ultraviolet (UV) radiation and the accompanying flux of photoelectrons to the formation of the fraction of suprathermal atomic hydrogen in the transition H<sub>2</sub> → H region and the formation of the non-thermal escape flux from the extended upper atmosphere of the exoplanet — hot neptune GJ 436b — is estimated. The rate of formation and the energy spectrum of hydrogen atoms formed with an excess of kinetic energy during the dissociation of H<sub>2</sub> are calculated.

Тепловой режим и скорость теплового убегания из атмосферы горячей экзопланеты существенно зависят от состава атмосферы. Более того, они тесно связаны через скорости нагрева и выхолаживания, как показывают аэрономические модели верхней атмосферы GJ 436b [1]. Процессы диссоциации, такие как фотодиссоциация, диссоциация электронным ударом, диссоциативная ионизация и др., — основные источники тепловых и надтепловых фрагментов молекул в состояниях электронного возбуждения в верхних атмосферах планет [2]. Молекула водорода является, с одной стороны, простейшей молекулой, однако ее диссоциация при поглощении звездного УФ-излучения и/или электронном ударе происходит посредством нескольких механизмов диссоциации. На длинах волны короче 845 Å прямое поглощение в континуумы состояний и электронного возбуждения является доминантным механизмом фотодиссоциации. Значения сечений для этих процессов достаточно высоки, и в результате диссоциации образуются атом водорода, в основном H(1s), и атом в возбужденном H(2s, 2p) состоянии. Из лабораторных исследований (Huebner et al., 1992) известно, что избыточные кинетические энергии атомов водорода, образующихся при фото- и ударной электронной диссоциации и диссоциативной ионизации молекулярного водорода, характеризуются двумя пиками по энергии фрагментов — в области низких энергий 0–1 эВ (медленные продукты диссоциации) и в области относительно высоких энергий 4–6 эВ (быстрые продукты диссоциации). Данные избыточные энергии в модели рассчитывались как разница между энергией поглощенного УФ фотона, энергией возбужденного электронного состояния и энергией диссоциации или диссоциативной ионизации и выбиралась из измеренных в лаборатории распределений. Фотолит богатой водородом атмосферы горячей экзопланеты жестким излучением родительской звезды приводит к образованию

надтепловых частиц (т. е. частиц с избытком кинетической энергии) — надтепловых атомов водорода в процессах диссоциации и диссоциативной ионизации  $\text{H}_2$ , которые могут вносить важный вклад в нетепловую потерю атмосферы горячей экзопланеты [2].



Расчетные энергетические спектры потока движущихся вверх надтепловых атомов водорода на высотах  $1.56 \cdot R_p$  (верхняя панель),  $1.75 \cdot R_p$  (средняя панель) и  $1.84 \cdot R_p$  (нижняя панель). Линиями синего цвета показаны потоки тепловых атомов  $\text{H}$ , рассчитанные для локально равновесного распределения атомарного водорода в соответствии с профилем температуры из модели [1]. Вертикальными красными линиями показаны энергии убегания атомов водорода на приведенных высотах

Планета GJ 436b с массой  $M_p = 0.07 M_{Jupiter}$  и радиусом  $R_p = 0.38 R_{Jupiter}$  вращается вокруг красного карлика Gliese 436 на орбите с большой полуосью 0.028 а. е. Для звезды Gliese 436 использовался аппроксимированный спектр в спектральном диапазоне 10–912 Å, разбитом на десять интервалов. При помощи численной стохастической модели горячей планетной короны [2, 3] исследованы на молекулярном уровне кинетика и перенос надтепловых атомов водорода в протяженной верхней атмосфере и рассчитан нетепловой поток убегания. Расчеты энергетических спектров восходящего потока надтепловых атомов водорода, представленные на рисунке, показывают, что процессы диссоциации  $\text{H}_2 \rightarrow \text{H}$  молекулярного водорода сопровождаются образованием и переносом в самые верхние слои переходной  $\text{H}_2 \rightarrow \text{H}$  области верхней атмосферы экзопланеты GJ 436b движущихся вверх надтепловых атомов водорода с кинетическими энергиями выше локальной энергии убегания. Поток убегания оценен величиной  $3.0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  для умеренного уровня звездной активности в УФ-излучении, что позволяет получить верхнюю оценку скорости потери атмосферы за счет процессов диссоциации  $\text{H}_2$ , равной  $7.8 \cdot 10^8 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$ . Расчетная величина входит в интервал полученных из наблюдений оценок возможной скорости потери атмосферы экзопланеты GJ 436b в диапазоне  $\sim (3.7 \cdot 10^6 - 1.1 \cdot 10^9) \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$  [4]. Полученная в

расчетах оценка скорости потери атмосферы экзопланетой GJ 436b за счет надтепловых атомов водорода может рассматриваться как среднее значение, так как расчеты проведены для условий умеренной звездной активности в УФ-излучении и для минимальных значений вероятностей преддиссоциации возбужденных электронных уровней молекулы  $H_2$ . Данный источник надтепловых атомов водорода рекомендуется включить в современные аэрономические модели физических и химических процессов в верхних атмосферах горячих экзопланет.

Исследование выполнено в рамках проекта № 075-15-2020-780 «Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных планетных систем и характеристик экзопланет» Министерства науки и высшего образования РФ.

## Библиографические ссылки

- [1] *Berezutsky A. G., Shaikhislamov I. F., Miroshnichenko I. B. et al.* Interaction of the Expanding Atmosphere with the Stellar Wind around Gliese 436b // *Solar System Research*. — 2019. — Vol. 53. — P. 138–145.
- [2] *Shematovich V. I.* Suprathermal hydrogen produced by the dissociation of molecular hydrogen in the extended atmosphere of exoplanet HD 209458b // *Solar System Research*. — 2010. — Vol. 44. — P. 96–103.
- [3] *Shematovich V. I.* Stochastic Models of Hot Planetary and Satellite Coronas // *Solar System Research*. — 2004. — Vol. 38, № 1. — P. 28–38.
- [4] *Kulow Jennifer R., France Kevin, Linsky Jeffery, Loyd R. O. Parke.* Ly $\alpha$  Transit Spectroscopy and the Neutral Hydrogen Tail of the Hot Neptune GJ 436b // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 786, № 2. — P. 132. 1403.6834.